

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Державного університету
«Житомирська політехніка»
доктору педагогічних наук, професору
БАКАЛЮК Тетяні Анатоліївні

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора,
професора кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки
Національного університету біоресурсів і природокористування України

ЛАХНА Валерія Анатолійовича

на дисертаційну роботу

САПОЖНИКА Дмитра Олеговича

на тему «Методи та алгоритми для розв'язання задачі максимального
розрізу за допомогою квантово-гібридних алгоритмів»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 12 – Інформаційні технології
за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення

Актуальність дисертаційного дослідження.

Задача максимального розрізу належить до класичних NP-складних задач, які мають фундаментальне значення для теорії обчислень і водночас широко застосовуються у практичних сферах, від мережевого аналізу та логістики до статистичної фізики й кластеризації. Наявні класичні алгоритми не усувають головного протиріччя між точністю та масштабованістю: методи повного перебору гарантують оптимальність, але мають експоненційне зростання складності; наближені та евристичні підходи працюють швидше, однак не завжди демонструють передбачувану якість на графах різної топології. У зв'язку з цим звернення до квантових і квантово-гібридних обчислень є обґрунтованим, особливо з огляду на розвиток платформ відкритого доступу, таких як IBM Quantum.

Разом із тим сучасні квантові пристрої не є універсальним розв'язанням проблеми: їх ефективність обмежена шумом, похибками операцій, кількістю кубітів і складністю реалізації глибоких схем. Тому актуальність дисертації полягає не лише в застосуванні квантового підходу до Max-Cut, а й у пошуку такої алгоритмічної архітектури, яка була б узгоджена з реальними обмеженнями NISQ-пристроїв.

Особливо важливим є те, що автор розглядає квантово-гібридний алгоритм як програмний об'єкт, який має бути формалізований, реалізований, запущений у різних середовищах і порівняний із наявними підходами. Такий акцент

відповідає профілю спеціальності, оскільки переносить дослідження з площини теоретичного опису у площину інженерної придатності. Тому вважаю, що тема дисертації «Методи та алгоритми для розв'язання задачі максимального розрізу за допомогою квантово-гібридних алгоритмів» є актуальною та своєчасною.

Достовірність, наукова новизна та практичне значення результатів.

Положення дисертації є достатньо обґрунтованими, оскільки спираються на комплекс методів: аналіз літературних джерел, формалізацію задачі Max-Cut, математичне моделювання, теорію алгоритмів, об'єктно-орієнтоване проєктування, симуляцію квантових схем, експериментальні дослідження та статистичну обробку результатів. Така методична база дає можливість оцінити роботу не лише як теоретичну розробку, а як цілісний програмно-алгоритмічний комплекс.

До найбільш суттєвих наукових результатів належать розробка квантово-гібридного алгоритму QASPA, формування детермінованої графо-залежної параметризації, запропонований метод масштабування кількості запусків і побудова квантових схем з використанням Hadamard-шару та блоків CX-RY-CX. Новизна зазначених положень полягає у відмові від багатоітераційного налаштування параметрів, характерного для низки варіаційних квантових алгоритмів, та у використанні структурних властивостей графа як основи для формування квантового обчислення.

Достовірність висновків підтверджується експериментами на 82 тестових графах різних типів, порівнянням із QAOA та методом повного перебору, а також демонстрацією виконання на апаратній платформі IBM Quantum. За поданими матеріалами алгоритм QASPA забезпечує середній коефіцієнт апроксимації 0.98-1.00 і стабільну успішність для досліджених випадків, що свідчить про перспективність запропонованої параметризації.

Важливим є і те, що автор не обмежився якісним описом алгоритму, а подав його математичний вигляд, логіку побудови схеми, правила підготовки вхідного графа та процедуру класичного аналізу результатів вимірювання. Завдяки цьому дисертація має не лише оглядовий, а й конструктивний характер, що є суттєвим для робіт зі спеціальності «Інженерія програмного забезпечення».

У дисертаційній роботі достатньо чітко простежується програмний контур дослідження: від нормалізації ваг і побудови матриці суміжності до формування схеми QASPA, локального запуску через AerSimulator та хмарного запуску з використанням Qiskit Runtime і SamplerV2. Це підсилює достовірність результатів, оскільки алгоритм подано не як абстрактну схему, а як реалізований обчислювальний процес із визначеними функціями, параметрами й етапами постобробки.

Практичне значення полягає у створенні програмних рішень на базі Qiskit, які можуть використовуватися для експериментів із квантово-гібридною оптимізацією, а також у запропонованому методичному підході до перетворення

прикладних задач у графові моделі типу Max-Cut. Результати можуть бути корисними для задач логістики, мережевого балансування, розподілу ресурсів і підтримки прийняття рішень. Факт практичного впровадження підтверджено відповідними довідками.

З позицій інженерії програмного забезпечення важливим є те, що дисертація містить не лише алгоритмічну ідею, а й реалізаційний контекст: вибір інструментарію, опис функцій локального та хмарного запуску, обробку результатів вимірювання і зіставлення отриманих рішень із відомими базовими підходами. Це наближує роботу до практичного використання у дослідницьких і прикладних програмних системах.

До переваг роботи можна віднести також орієнтацію на повторюваність обчислювальної процедури. Запропонована детермінована параметризація полегшує відтворення експериментів, оскільки значна частина невизначеності, пов'язаної з вибором початкових параметрів оптимізатора, усувається ще на етапі підготовки квантової схеми.

Окрему практичну вагу має те, що запропонований підхід може бути використаний як основа для навчальних і дослідницьких програмних модулів з квантової оптимізації. Наявність зрозумілої структури вхідних даних, процедури побудови схеми та етапу класичної інтерпретації результатів робить алгоритм придатним для подальшого порівняльного тестування і розширення.

Аналіз основного змісту дисертації.

У першому розділі дисертації автор дослідив сучасний стан класичних, квантових та квантово-гібридних підходів до розв'язання задачі Max-Cut. Проведений аналіз показав, що класичні методи мають суттєві обмеження при масштабуванні, тоді як варіаційні квантові алгоритми стикаються з проблемами параметричного пошуку та чутливості до шумів. Це обґрунтовує необхідність розробки альтернативної схеми квантово-гібридного обчислення.

Другий розділ є центральним з погляду алгоритмічної новизни. У ньому представлено QASPA як одноітераційний алгоритм, у якому попередня класична обробка графа завершується формуванням матриці кутів, після чого квантова схема виконується без зворотного циклу оптимізації параметрів. Така організація обчислень зменшує залежність від класичного оптимізатора і потенційно робить алгоритм стійкішим у практичному застосуванні.

Третій розділ присвячено програмній реалізації та експериментальним дослідженням. Використання Qiskit є виправданим, оскільки цей інструментарій забезпечує моделювання квантових схем, транспіляцію та доступ до реальних квантових пристроїв. Представлені результати на симуляторах і обладнанні IBM Quantum демонструють, що запропонований підхід може давати оптимальні або квазіоптимальні розв'язки у дослідженому діапазоні розмірності.

Окремо слід відзначити, що автор дослідив питання масштабування кількості квантових запусків, яке є практично значущим для будь-якого

алгоритму, що працює з імовірнісними результатами вимірювання. Запропонована афінно-експоненційна апроксимація не претендує на остаточне розв'язання проблеми масштабованості, проте створює зрозумілий орієнтир для вибору кількості вимірювань залежно від розмірності графа.

Порівняльний розділ містить важливі кількісні деталі: QASPA коректно спрацював на 17 ручних тестових випадках і 65 згенерованих графах, а часові вимірювання для повних графів із 10-19 вершинами показали інтервал виконання 0.0846-0.4643 с проти 2.7238-8.8575 с для QAOA і 0.0118-20.0923 с для повного перебору. Такі дані роблять висновки роботи більш предметними, хоча потребують обережної інтерпретації з огляду на масштаб тестів і умови запуску.

Загальна структура дисертації є послідовною та відповідає логіці наукового дослідження. Робота складається з анотації, вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Обсяг дисертації становить 234 сторінки, із них 167 сторінок основного тексту; наведено 2 таблиці, 63 рисунки, список використаних джерел із 136 найменувань, з яких 131 – іноземною мовою, та 5 додатків.

Висновки дисертації корелюються із завданнями дослідження та відображають отримані результати: аналіз сучасного стану підходів до Max-Cut, розробку QASPA, метод масштабування кількості запусків, програмну реалізацію і порівняльну оцінку ефективності. Це свідчить про внутрішню узгодженість роботи та наявність завершеного наукового результату.

Публікації, апробація та академічна доброчесність.

Основні положення дисертації оприлюднено у 11 наукових працях, що включають 4 статті у фахових виданнях України категорії «Б», 1 статтю у виданні, індексованому у Scopus, та 6 конференційних публікацій. Результати доповідалися на міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях, що підтверджує їх відкриту апробацію в професійному середовищі.

Тематика виступів і публікацій охоплює квантові вентиля, $Q\#$ і QUBO-підходи, публічні бібліотеки для роботи з квантовими обчисленнями, а також прикладні напрями використання квантових комп'ютерів. Така послідовність свідчить, що здобувач системно працював у вибраному напрямі, а не обмежився одиничною експериментальною реалізацією.

Дисертаційна робота написана українською мовою, матеріал поданий у науковому стилі з використанням термінології квантових обчислень, теорії графів, алгоритмів та інженерії програмного забезпечення. Формули, схеми, блок-діаграми й експериментальні графіки доречно доповнюють текст і сприяють розумінню логіки дослідження.

Позитивно слід оцінити використання значного масиву джерел, переважна більшість яких є іноземними. Для напряму квантових обчислень це має особливе значення, оскільки основні методичні й технологічні напрацювання швидко

оновлюються саме в міжнародній науковій літературі та документації провідних платформ.

За змістом поданих матеріалів дисертація є самостійною працею здобувача. Посилання на джерела наведено, особистий внесок у спільних публікаціях окреслено, а використання технологій штучного інтелекту обмежено допоміжною візуалізацією. Підстав для висновку про порушення академічної доброчесності немає.

Зазначене дає підстави позитивно оцінити як наукову культуру оформлення результатів, так і прозорість представлення авторського внеску. Для дисертацій у сфері квантового програмування це особливо важливо, оскільки значна частина досліджень спирається на відкриті фреймворки, бібліотеки та апаратні платформи, коректне використання яких потребує чіткого посилання і відмежування власних результатів.

Окремі зауваження та запитання.

1. У другому розділі наведено правило формування матриці кутів і передбачено врахування ваг ребер, однак основна експериментальна частина зосереджена переважно на незважених графах. Було б доцільно докладніше показати, як змінюється якість QASPA для зважених графів із різними розподілами ваг.

2. Генеровані тести охоплюють Complete, Cycle та Erdős-Rényi графи з 3-14 вершинами, але кількість повторів і випадкових структур є обмеженою. Робота стала б переконливішою за наявності більшої кількості seed-ів, реальних мережеских графів і статистичних інтервалів для success rate та approximation ratio.

3. У дисертації описано використання measurement error mitigation, zero-noise extrapolation і dynamical decoupling, проте не повністю відокремлений внесок кожної з цих технік у підсумкову якість результату. Варто було б подати абляційне порівняння запусків без пом'якшення похибок і з різними його комбінаціями.

4. QAOA у порівняльних експериментах реалізовано з обмеженою кількістю ітерацій класичного оптимізатора, що відповідає логіці зіставлення з одноітераційним QASPA, але водночас не вичерпує потенціалу QAOA. Доцільно було б окремо порівняти QASPA з QAOA для різних значень глибини p , різних оптимізаторів і warm-start ініціалізації.

5. Для підвищення відтворюваності доцільно було б винести в окрему таблицю версії Qiskit, Qrisp і NetworkX, значення seed-ів, параметри транспіляції, назви бекендів IBM Quantum та калібрувальні характеристики на момент апаратних запусків.

До дискусійних також належить питання про те, чи можна зберегти одноітераційну перевагу QASPA при переході від Max-Cut до споріднених задач, зокрема Max-k-Cut, розфарбування графа або пошуку максимального

незалежного набору, де структура обмежень може вимагати іншої схеми кодування.

Висловлені зауваження мають уточнювальний і рекомендаційний характер. Вони окреслюють можливі напрями продовження дослідження, але не ставлять під сумнів основні результати дисертації.

У цілому дисертаційне дослідження справляє враження логічно завершеної роботи, у якій поєднано постановку складної оптимізаційної задачі, розробку авторського алгоритму, його програмну реалізацію та експериментальну апробацію. Такий рівень опрацювання матеріалу відповідає вимогам до наукової праці, виконаної на здобуття ступеня доктора філософії.

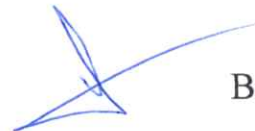
Висновок про дисертаційну роботу.

Дисертаційна робота Сапожника Дмитра Олеговича «Методи та алгоритми для розв'язання задачі максимального розрізу за допомогою квантово-гібридних алгоритмів» є завершеною науковою працею, у якій отримано нові результати щодо побудови квантово-гібридних алгоритмів для задач комбінаторної оптимізації. Сукупність теоретичних положень, програмної реалізації та експериментальної перевірки свідчить про досягнення поставленої мети і розв'язання визначених завдань.

Дисертація відповідає вимогам чинного законодавства України до робіт на здобуття ступеня доктора філософії, зокрема «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44. Сапожник Дмитро Олегович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 – Інформаційні технології за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук,
професор кафедри комп'ютерних систем,
мереж та кібербезпеки
Національного університету біоресурсів
і природокористування України



Валерій ЛАХНО

